

УДК [656.61.052.1 : 527] : 639.2.081.117

**Динамика судна при прицельном кошельковом лове****А.А. Соловьев, С.Н. Шугай***Судоводительский факультет МА МГТУ, кафедра управления судном и промышленного рыболовства*

**Аннотация.** В работе исследована динамика судна при автоматическом облове подвижных рыбных скоплений. Предложены алгоритмы построения траекторий прицельного замата кошелькового невода. Приведены примеры построения траекторий при облове подвижных косяков кошельковым неводом.

**Abstract.** The paper considers the dynamics of vessel at automatic catch of mobile fish congestions. The algorithms of constructing trajectories of aim trawling by purse seine have been proposed. Examples of plotting trajectories at fishing mobile schools by the purse seine have been given.

**Ключевые слова:** кошельковый лов, математическое моделирование, пропорциональная навигация, рыболовное судно, автоматизация, программная траектория

**Key words:** purse seining, mathematical modeling, proportional navigation, fishing vessel, automation, program trajectory

**1. Введение**

Одним из основных способов прицельного лова в настоящее время является траловый лов. Первой задачей настоящего исследования является изучение динамики идеального движения судна или системы "судно – трал" при прицельном облове подвижного рыбного скопления.

Динамику идеального движения судна будем изучать при следующих ограничениях:

- движение центра плотности рыбного скопления – равномерное и прямолинейное;
- скорость судна и трала постоянны.

Судно будем рассматривать как твердое тело, управляемое рулевым устройством, движущееся под действием силы тяги винта, гидродинамических и инерционных сил и их моментов.

Динамический анализ идеального движения позволит определить возможность осуществления прицельного облова рыбного скопления при данных начальных условиях движения, а также построить траектории движения судна и орудия лова для выбранного способа облова.

**2. Математическая модель движения системы "судно – кошельковый невод"**

При кошельковом лове предполагается, что траектория кошелькового невода совпадает с траекторией движения судна, поэтому уравнения, описывающие движение судна при замате кошелькового невода, имеют вид:

$$\begin{cases} m(1+k_{11})\dot{v}\cos\beta - m(1+k_{11})v\dot{\beta}\sin\beta + m(1+k_{22})v\omega\sin\beta = T_E - X_K - X_P; \\ -m(1+k_{22})\dot{v}\sin\beta - m(1+k_{22})v\dot{\beta}\cos\beta + m(1+k_{11})v\omega\cos\beta = Y_K + Y_B - Y_P + Y_A; \\ J_Z(1+k_{66})\dot{\omega} - m(k_{22}-k_{11})v^2\sin\beta\cos\beta = M_K + M_P - M_B - M_A, \end{cases} \quad (1)$$

где  $k_{11}$ ,  $k_{22}$  – коэффициенты присоединенных масс вдоль продольной и поперечной осей судна;  $k_{66}$  – коэффициент присоединенного момента инерции;  $m$  – масса судна;  $J_z$  – момент инерции судна относительно вертикальной оси  $OZ$ ;  $X_P$ ,  $Y_P$ ,  $M_P$  – продольная, поперечная силы на руле и момент, создаваемый поперечной силой руля относительно ЦТ судна;  $X_K$ ,  $Y_K$ ,  $M_K$  – продольная, поперечная корпусные силы и момент, создаваемый поперечной корпусной силой относительно ЦТ судна;  $Y_B$ ,  $M_B$  – поперечная сила от гребного винта, и момент, создаваемый этой силой относительно ЦТ судна;  $Y_A$ ,  $M_A$  – поперечная аэродинамическая сила, и момент, создаваемый этой силой относительно ЦТ судна;  $T_E$  – полезная тяга гребного винта.

Авторами предложены алгоритмы построения траекторий прицельного облова рыбного скопления кошельковым неводом, в основе которых лежит метод пропорциональной навигации. Суть метода состоит в том, что угловая скорость вращения вектора скорости "преследователя" должна быть прямо пропорциональна угловой скорости линии визирования. В общем случае эта зависимость выражается уравнениями:

$$dq/d\tau = K d\theta/d\tau; \quad d^2q/d\tau^2 = K d^2\theta/d\tau^2; \quad d^3q/d\tau^3 = K d^3\theta/d\tau^3, \quad (2)$$

где  $q$  – угол скорости судна,  $K$  – коэффициент пропорциональности,  $\theta$  – угол визирования.

Интегрируя уравнение (2), получаем:

$$q = K\theta + C; \quad C = \theta(1 - K) + \varepsilon_0, \quad (3)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования, определяемая по начальным данным;  $\varepsilon_0$  – начальный угол упреждения.

Для получения автономного уравнения, связывающего угол скорости судна  $q$  с углом перекладки руля, были использованы линеаризованные уравнения движения системы "судно – кошельковый невод", которые достаточно хорошо описывают движение системы в слабых маневрах:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = B_1\beta + B_2\omega + B_3\alpha_R; \\ \dot{\beta} = A_1\beta + A_2\omega + A_3\alpha_R; \\ \dot{q} = \omega - \beta, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\beta$  – угол дрейфа судна;  $\omega$  – угловая скорость судна;  $\alpha_R$  – угол перекладки руля;  $q$  – угол скорости судна;  $A_1$ - $A_3$  и  $B_1$ - $B_3$  – постоянные коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров системы.

Система уравнений (4) содержит три неизвестных ( $\beta$ ,  $\omega$ ,  $q$ ), каждое из которых принципиально может быть принято за управляемую координату, и один параметр управления  $\alpha_R$ . Последовательным исключением из системы этих уравнений всех неизвестных, кроме одной, можно получить независимые уравнения относительно каждой управляемой координаты. Автономное уравнение, связывающее угол скорости с углом перекладки руля, имеет вид:

$$\ddot{q} + C_1\dot{q} + C_2q = C_3\alpha_R + C_4\dot{\alpha}_R. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет определить закон изменения угла руля при движении судна по любой кривой, уравнение которой может быть представлено в виде:

$$q = f_1(\tau); \quad \dot{q} = f_2(\tau, q); \quad \ddot{q} = f_3(\tau, q, \dot{q}); \quad \ddot{\tau} = f_4(\tau, q, \dot{q}, \ddot{q}). \quad (6)$$

Таким образом, задавая начальные позиции косяка и трала, курс и скорость косяка, а также способ наведения, можно получить законы изменения угла визирования и расстояния "трал – косяк"; из уравнения (6) – получить закон изменения угла скорости трала, построить траектории движения трала и судна для выбранного способа наведения; из уравнения (5) – получить закон перекладки руля. Система уравнений (4) позволит вычислить угол дрейфа и угловую скорость судна и определить гидродинамические силы и моменты, действующие на корпус судна. В результате станет возможным моделирование ситуации облова рыбного скопления на ЭВМ.

### 3. Вычисление коэффициента пропорциональности

В настоящее время широко используются 2 вида прицельного зрелища кошелькового невода: на постоянном курсовом угле на центр плотности косяка (ЦПК) и постоянной дистанции до ЦПК. Таким образом, задача состоит в том, чтобы найти зависимость между углом визирования и углом скорости судна, а также определить закон изменения угла упреждения при изучении динамики зрелища кошелькового невода на постоянном курсовом угле или на постоянной дистанции от центра плотности косяка. Вычислительные эксперименты показывают, что коэффициент пропорциональности при кошельковом лове может быть равен только единице, т.к. при  $K > 1$  траектория движения судна не охватывает рыбное скопление из-за большой кривизны, а при  $K < 1$  – из-за очень малой кривизны. При этих условиях, а также с учетом, что угол визирования  $\theta$  есть направление от ЦПК на судно – уравнения для вычисления производных, входящих в уравнение (2), принимают следующий вид:

$$\begin{cases} d\theta/d\tau = -[v_K \sin(K_K - \theta) - v \sin C]/D_K; \\ d^2\theta/d\tau^2 = [v_K \cos(K_K - \theta) - (dD_K/d\tau)(d\theta/d\tau)]/D_K; \\ d^3\theta/d\tau^3 = \{v_K [d^2\theta/d\tau^2 \cos(K_K - \theta) + (d\theta/d\tau)^2 \sin(K_K - \theta)] - (d^2D_K/d\tau^2)(d\theta/d\tau) - \\ \quad - 2(dD_K/d\tau)(d^2\theta/d\tau^2)\}/D_K; \\ dD_K/d\tau = -v_K \cos(K_K - \theta) + v \cos C; \\ d^2D_K/d\tau^2 = -\theta v_K \sin(K_K - \theta). \end{cases} \quad (7)$$

При зрелище невода на постоянной дистанции до ЦПК система уравнений (7) упрощается:

$$\begin{cases} d\theta/d\tau = -[v_K \sin(K_K - \theta) - v \sin C]/D_K; \\ d^2\theta/d\tau^2 = [v_K \cos(K_K - \theta) d\theta/d\tau]/D_K; \\ d^3\theta/d\tau^3 = v_K [d^2\theta/d\tau^2 \cos(K_K - \theta) + (d\theta/d\tau)^2 \sin(K_K - \theta)]/D_K, \end{cases} \quad (8)$$

где  $K_K$  – курс косяка,  $v_K$  – скорость косяка,  $D_K$  – дистанция до ЦПК.

Текущий угол упреждения  $C$  определим из условия условия, что  $D_K/d\tau = 0$ .

#### 4. Вычисление сигнала управления при автоматическом управлении судна

Рассмотрим сначала алгоритм вычисления курса судна при замете невода на постоянном курсовом угле на ЦПК.

Для вычисления производных, входящих в систему уравнений уравнения (7), на каждом шаге интегрирования рассчитывается текущий угол упреждения:

$$C = 180^\circ - \beta - K_Y, \quad (9)$$

где  $K_Y = \text{const}$ . В начальный момент времени угол дрейфа судна  $\beta$  примем равным нулю. Затем из уравнений (2) определим угол скорости судна  $q$  и его производные, из уравнения (5) найдем текущий угол перекладки руля, а из системы уравнений (4) – текущий угол дрейфа и угловую скорость судна. Затем рассчитаем пеленг  $P_K$  на косяк и курс судна  $\psi$ :

$$P_K = \theta + 180^\circ, \quad (10)$$

$$\Psi = P_K - K_Y. \quad (11)$$

При замете невода на постоянной дистанции от ЦПК текущий угол упреждения  $C$  определим из уравнения:

$$dD_K/d\tau = -v_K \cos(K_K - \theta) + v \cos C,$$

при условии, что  $dD_K/d\tau = 0$ :

$$C = \arccos [v_K / v \cos(K_K - \theta)]. \quad (12)$$

Далее вычисления выполним в той же последовательности, что и при замете невода на постоянном курсовом угле. При этом для любого выбранного способа автоматического замета кошелькового невода за управляемую координату можно принять курс судна, вычисляемый по формуле (11). Таким образом, управляющий сигнал можно представить в виде:

$$\varepsilon_C = k_\varphi \Delta\Psi - k_\varphi \Delta\dot{\Psi} - k_{OC} a_R,$$

где  $\Delta\Psi$  – угол рассогласования между расчетным и текущим курсом судна, а  $\Delta\dot{\Psi}$  – скорость его изменения.

#### 5. Заключение

Полученные алгоритмы позволяют:

- построить траектории движения судна при прицельном замете кошелькового невода двумя способами: на постоянном курсовом угле на центр плотности рыбного скопления и постоянной дистанции от ЦПК;
- рассчитать угол перекладки руля и кинематические характеристики судна (угол дрейфа, угловую скорость судна, угол скорости) в течение всего периода замета кошелькового невода;
- используя кинематические характеристики, рассчитать силы и моменты, действующие на корпус судна;
- сформировать управляющий сигнал для автоматического управления судном в период облова рыбного скопления.